

## **Estudo da viabilidade de construção de pontes em arco**



**Pedro Santos<sup>1</sup>**



**Miguel Morais<sup>2</sup>**



**Humberto Varum<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

As pontes de alvenaria em arco são o testemunho do engenho a nível de concepção, método construtivo e carácter estético. Existem inúmeros exemplos de pontes em alvenaria de pedra que atravessaram vários séculos até aos nossos dias, continuando a cumprir as suas funções com um nível de desempenho adequado. Actualmente é rara a construção desta tipologia de pontes. As reconhecidas dificuldades associadas à construção de pontes em arco, agravado pelo surgimento de novos materiais, justificam o declínio desta solução estrutural.

As vantagens associadas ao comportamento estrutural deste tipo de pontes e a estética da construção em alvenaria, motivou o desenvolvimento de novos processos para uma construção mais simples e sobretudo mais rápida. Neste trabalho estudou-se a viabilidade de construção de pontes em arco com recurso a blocos maciços de betão. A não inclusão de qualquer tipo de armadura nesta solução traduz-se numa maior durabilidade, eliminando os problemas associados ao destacamento de betão e à corrosão. De referir ainda que na produção dos blocos para a solução proposta poderão ser incorporados resíduos de construção e demolição. Propõe-se uma solução em arco para a construção de passagens inferiores, agrícolas e hidráulicas ou para aplicações com vãos até 12 metros. Foram avaliadas numericamente três modulações correspondendo a 4, 9 e 12 metros de vão. Em cada caso, o número de aduelas é definido em função de critérios que facilitem o seu transporte.

Com a solução proposta pretende-se justificar a viabilidade de construção de pontes em arco recorrendo a métodos de construção simples, de rápida execução, contribuindo para a utilização desta tipologia estrutural, com a qualidade e durabilidade que caracterizam as pontes de alvenaria.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Pontes, arco, alvenaria, betão, sustentabilidade.

<sup>1</sup> Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. pmsantos@ua.pt

<sup>2</sup> Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. miguelmorais@ua.pt

<sup>3</sup> Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal. hvarum@ua.pt

## 1. INTRODUÇÃO

As pontes de alvenaria em arco são um exemplo de excelência em concepção, método construtivo e carácter estético. Inúmeras pontes com esta tipologia foram erguidas séculos atrás e actualmente ainda desempenham as suas funções de forma adequada integrando as redes rodoviárias e ferroviárias 'Fig. 1'. Devido ao uso generalizado de novos materiais (aço e betão armado) associado à complexidade da construção em arco, o uso desta solução estrutural caiu em declínio. Numa altura em que urge reabilitar vias e suas passagens, é essencial avaliar a viabilidade de novas construções de pontes de blocos em arco.



Figura 1. Duas pontes em Portugal: a) ponte romana sobre o rio Alva, Arganil;  
b) ponte do diabo, Misarela.

As pontes de alvenaria têm diversas vantagens quando comparadas com outras tipologias de pontes construídas actualmente, nomeadamente pontes de aço ou betão armado, a nível de comportamento estrutural, durabilidade, longevidade e baixo nível de manutenção necessário. Estes factores resultam num aproveitamento económico a longo prazo. O carácter estético e os materiais naturais utilizados resultam em baixo impacto ambiental. Por outro lado, a construção de alvenaria em arco apresenta algumas dificuldades como a construção do cimbrio, o assentamento individual de blocos, a colocação de argamassa nas juntas, a produção e transporte dos blocos e a elevada qualificação dos operários. É interessante analisar o que é possível obter a partir de uma solução construtiva antiga utilizando os materiais actuais e novos métodos de dimensionamento disponíveis.

Pretendeu-se desenvolver um sistema construtivo estudando novas geometrias de aduelas e métodos de assentamento capazes de tornar a construção de pontes de alvenaria em arco apelativa em termos económicos e de facilidade de construção.

## 2. CONCEITO

O betão foi escolhido como material principal deste projecto devido à sua ubiquidade, resistência à compressão, possibilidade de moldar com uma determinada forma geométrica e possibilidade de pré-fabricação. Mesmo sabendo que os métodos de produção e corte de pedra são mais fáceis devido às novas máquinas existentes, o seu custo e necessidade de transporte justificam o uso do betão, uma vez que as peças podem ser betonadas no próprio estaleiro da obra. Existe ainda a possibilidade de utilizar resíduos da construção e demolição na composição do betão, uma vez que não é necessária uma elevada resistência à compressão do betão. O aço utilizado no betão armado muitas vezes leva à degradação do material devido à corrosão do aço. Para evitar problemas associados a este efeito e por os elementos estarem sempre comprimidos foi escolhida uma solução de betão simples.

As aduelas devem ter o processo de betonagem, descofragem e transporte no estaleiro facilitado. O intradorso deve ser curvo para manter o carácter estético. Por outro lado, sendo o extradorso coberto pelo enchimento da ponte, esta face pode ter pior qualidade que o intradorso, optando-se por uma composição a partir da sucessão de superfícies planas. As dimensões das aduelas foram definidas pela

espessura do arco que garante as condições de segurança para os casos de carga definidos no Regulamento de Segurança e Acções e pelo número de aduelas pretendido por arco.

### 3. VÃOS

Tendo em consideração o tipo de passagens a construir com esta solução, hidráulica, rural e inferior, foram escolhidos três vãos: 4,0 m, 9,0 m e 12,0 m, sendo possível a partir dos mesmos obter um arco mais abatido para um vão menor reduzindo o número de aduelas ou garantir gabarits através da elevação dos arranques, 'Fig. 2'.

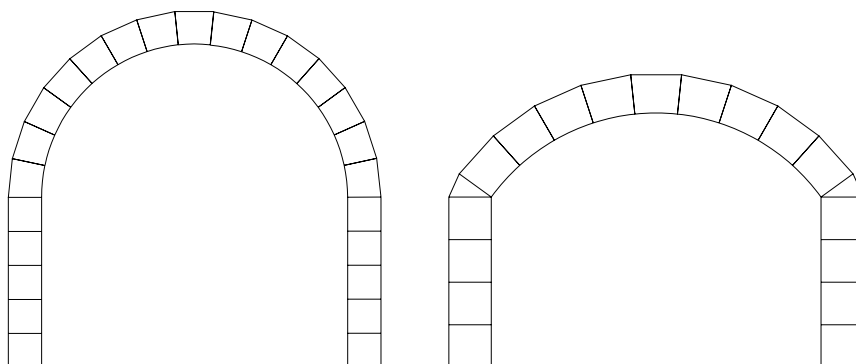


Figura 2. Arcos com arranques elevados.

### 4. ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE PONTES EM ARCO

No passado, os arcos de alvenaria eram dimensionados através de métodos empíricos baseados na experiência e observação, relacionando a espessura do arco com o vão [1]. Apenas após os séculos XVII e XVIII os arcos foram analisados de forma científica [2]. Couplet assumiu três princípios de forma a analisar um arco usando a análise plástica: a) a alvenaria é incapaz de resistir à tracção; b) as tensões efectivas são tão baixas que a alvenaria tem resistência infinita à compressão; c) não ocorre colapso por deslizamento de aduelas [3]. Existem duas formas de dimensionar um arco: resistência e estabilidade. Considerando o segundo princípio de Couplet, o único problema é o dimensionamento da espessura do arco que permite a estabilidade, podendo também dizer-se que se pretende determinar a espessura do arco que envolve um número infinito de posições da linha de pressões na sua geometria. O teorema do arco limite permite obter o factor geométrico de segurança relacionando a espessura de um arco com a espessura mínima que apenas contém uma única linha de pressões dentro do mesmo [4].

Os três vãos anteriormente mencionados foram analisados através da aplicação informática RING2.0 [5]. Esta ferramenta determina a sobrecarga que pode ser aplicada para que ocorra um colapso estrutural, a configuração de colapso com indicação da linha de pressões. Esta aplicação permite também a análise de múltiplos vãos, deslizamento e esmagamento de aduelas com aplicação de cargas estáticas ou rolantes [5]. A geometria dos arcos foram definidas no RING2.0 como semicircunferências com 1,0 m de desenvolvimento num único vão num arco composto por 9 aduelas com 1,0 m de terra sobre o topo arco. Foi também considerado que os arranques seriam capazes de resistir às acções verticais e horizontais.

Relativamente às características dos materiais, foram considerados os seguintes parâmetros: peso volúmico da alvenaria de betão de  $24 \text{ kN/m}^3$ , resistência à compressão de 20 MPa e modelação do deslizamento de aduelas com coeficiente de atrito de 1,0. Para o enchimento: peso volúmico de  $18 \text{ kN/m}^3$ , ângulo de atrito de 30 graus e coesão nula (características de solo granular). Foram também considerados os efeitos de dispersão de sobrecargas e de impulso passivo das terras do enchimento.

Foram estudados dois casos de carga de acordo com o RSA, considerando que o arco servirá uma ponte de classe I (sujeita a tráfego pesado ou intenso): sobrecarga gerada por um veículo de três eixos equidistantes com uma carga de 200 kN por eixo e sobrecarga composta por uma carga distribuída (4 kN/m<sup>2</sup>) e uma carga vertical transversal (50 kN/m). O primeiro caso de carga foi considerado como uma carga rolante, capaz de se situar em qualquer ponto sobre o arco e o segundo caso aplicado apenas a meio vão sendo a pior situação para este caso 'Fig. 3'.



As espessuras obtidas estão expressas no Quadro 1.

Quadro 1. Espessura do arco para o vão correspondente.

Vão [m]	Espessura do arco [m]
4	0.550
9	0.950
12	1.125

## 5. GEOMETRIA DOS BLOCOS

Foi decidido que os arcos seriam compostos por um número ímpar de aduelas de igual geometria facilitando o processo de fabrico e construção. Pretendendo definir o número de aduelas por arco, foram estudadas algumas possibilidades: 7, 9, 13 e 15 aduelas por arco. Efectuando uma análise simples em termos de volume, peso para uma única aduela e para um arco inteiro, ficou claro que para uma única aduela, quando o número de blocos por arco aumenta, o seu volume diminui, mas o volume total para um arco inteiro é praticamente constante. A ligeira variação no volume é devido ao extradorso não ser curvo.

Concluiu-se que o peso das aduelas é importante em termos de transporte. Grande parte das gruas telescópicas actualmente comercializadas têm carga limite de 5 toneladas, levando à opção de limitar o peso máximo por bloco em 5 toneladas. Foi então definido o seguinte critério: o menor número de aduelas possível por arco cujo peso por aduela é inferior a 5 toneladas.

Após definição do número de aduelas por arco, foi possível obter as diferentes configurações geométricas com o mínimo de 3 aduelas ou uma razão vão/flecha máxima de 6, que representa uma das limitações da aplicação informática de análise de arcos no que toca a arcos muito abatidos e as suas deformações plásticas. As figuras e quadros seguintes ilustram os vãos possíveis de realizar a partir de cada configuração base 'Figs. 1 a 6' e Quadros 1 a 4.

Quadro 2. Flecha e razão vão/flecha para cada um dos vãos possíveis com a configuração de 4,0 m.

Vão [m]	Flecha [m]	v/f	Aduelas [un]
4,00	2,00	2,00	7
3,60	1,13	3,19	5
2,49	0,44	5,66	3

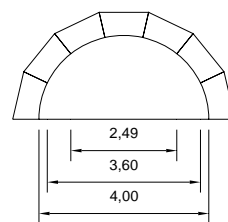


Figura 4. Geometria e vãos possíveis com as aduelas para a configuração de 4,0 m.

Quadro 3. Flecha e razão vão/flecha para cada um dos vãos possíveis com a configuração de 9,0 m.

Vão [m]	Flecha [m]	v/f	Aduelas [un]
9,00	4,50	2,00	11
8,64	3,23	2,67	9
7,57	2,07	3,66	7
5,89	1,10	5,35	5

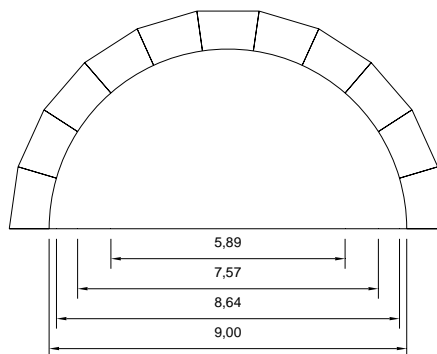


Figura 5. Geometria e vãos possíveis com as aduelas para a configuração de 9,0 m.

Quadro 4. Flecha e razão vão/flecha para cada um dos vãos possíveis com a configuração de 12,0 m.

Vão [m]	Flecha [m]	v/f	Aduelas [un]
12,00	6,00	2,00	15
11,74	4,75	2,47	13
10,96	3,56	3,08	11
9,71	2,47	3,93	9
8,03	1,54	5,21	7

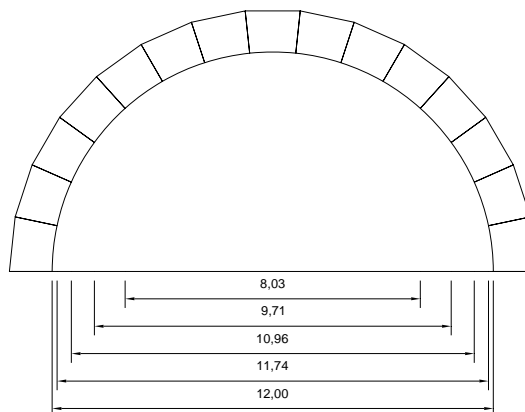


Figura 6. Geometria e vãos possíveis com as aduelas para a configuração de 12,0 m.

### 5.1. Blocos especiais

De forma a poder assentar os blocos com juntas verticais desfasadas é necessário recorrer a um bloco cuja profundidade é metade dos blocos normais. Estes blocos podem ser assentes, um por fiada ou dois em fiadas intercaladas 'Fig. 7'.

Uma vez que o extradorso não tem um formato semicircular, de forma a atingir a estética da construção tradicional em alvenaria é possível construir arcos exteriores compostos por blocos especiais cuja face voltada para o exterior tem duas faces curvas, intradorso e extradorso 'Fig. 8'.



Figura 7. Planta de um arco com diferentes opções de assentamento: a) um meio bloco por fiada; b) dois meios blocos em fiadas intercaladas.

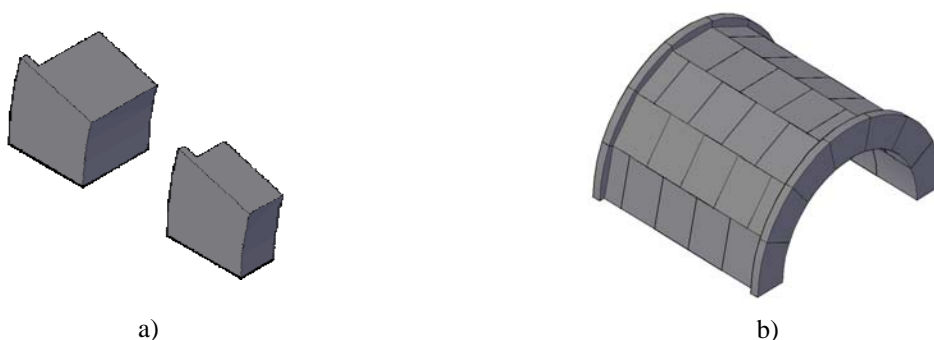


Figura 8. Blocos exteriores: a) bloco inteiro e meio bloco; b) vista do extradorso do arco montado.

## 6. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção de um protótipo permitiu verificar a viabilidade da solução na fase de betonagem das aduelas e construção do arco. Foi feita uma parceria com uma empresa do sector da construção para construir um arco semicircular com 4,0 m de vão e 2,5 m de profundidade composto por 14 blocos e 7 meios blocos (um por fiada) sendo os arcos compostos por 7 blocos 'Fig. 9'.

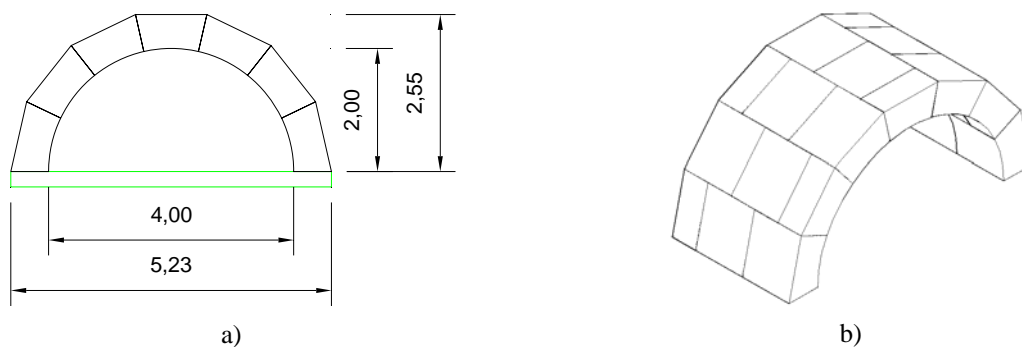


Figura 9. Projecto do protótipo: a) dimensões; b) perspectiva.

A cofragem foi construída utilizando madeira para a face inferior de forma a constituir uma face curva e cofragem metálica nas faces laterais, 'Fig 10'. Os blocos foram betonados em séries de três e descofrados recorrendo a uma empilhadora ou uma giratória de rastros, 'Fig 11'.



a)



b)

Figura 10. Aduelas após remoção da cofragem lateral: a) detalhe da face inferior da cofragem; b) vista geral.



Figura 11. Descofragem com empilhadora



Figura 12. Ferrolhos

Durante a betonagem foram introduzidos ferrolhos na face superior de cada bloco, 'Fig. 12'. Estes permitiram a elevação e movimentação das aduelas no estaleiro através de correias presas nos ferrolhos. A equipa de trabalho foi composta por um encarregado, um manobrador da escavadora e três operários. Enquanto se assentavam os primeiros blocos foram imediatamente constatadas as diferenças geométricas entre os blocos de betão. Esta heterogeneidade teve origem na cedência da cofragem de madeira durante a cura resultando num assentamento de aduelas com juntas muito abertas 'Fig. 13'.



Figura 13. Juntas verticais.



Figura 14. Uso de roldana.

Foram encontradas algumas dificuldades enquanto os blocos se encontravam no ar, uma vez que atingiam uma determinada inclinação. Utilizando um garibalde foi possível controlar a inclinação 'Fig. 14'. Quando a inclinação do bloco enquanto elevado não era coincidente com a inclinação final, significava que este teria de rodar sobre um ponto quando assente resultando em esmagamento local das arestas agravado pelo pouco tempo de cura 'Fig 15'. Pequenos ajustes na posição das aduelas foram feitos recorrendo a cunhas metálicas ou de madeira resultando em esmagamento local onde as cunhas foram inseridas 'Fig. 16'.

No intradorso foram utilizados prumos metálicos comuns como cimbre. Em vez de utilizar cimbre em arco foram colocadas vigas de madeira transversais nas juntas horizontais apoiadas nos prumos que



por sua vez estavam apoiados na fundação 'Fig. 17'. Foi colocado um prumo em cada junta vertical sendo que essa escora permitiria o assentamento da aduela seguinte.



Figura 15. Esquina esmagada.



Figura 16. Utilização de cunhas e esmagamento consequente.



Figura 17. Suporte de aduelas em escoras.

Foi testado um sistema de encaixe do tipo macho-fêmea utilizando pequenos varões de aço com 16 mm de diâmetro inseridos cerca de 20 cm dentro dos blocos na face superior e furos na face inferior perpendiculares ao plano da face. Este método é eficaz quando a aproximação das aduelas é feita perpendicularmente à face sendo de difícil execução na prática levando a ajustes através de cunhas 'Fig. 18'.



a)



b)

Figura 18. Sistema de encaixe: a) varões inseridos; b) assentamento.

Durante a construção de um arco devem ser adoptadas medidas preventivas de modo a evitar falhas no alinhamento através de verificação constante entre o andamento da construção e o projectado. Foram verificadas algumas falhas no alinhamento na construção do protótipo que foram prontamente resolvidas através da tensão ou alívio dos prumos. Após o assentamento da fiada da pedra-chave o sistema de escoramento foi removido e os trabalhos terminaram 'Fig. 19'.





Figura 19. Protótipo: a) vista frontal; b) perspectiva.

## 7. RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS ENCONTRADOS

Foram encontrados diversos problemas durante o processo de construção do protótipo, permitindo a identificação da sua origem de forma a propor soluções para os mesmos. A geometria das aduelas era heterogénea resultando em dificuldades no assentamento correcto e esmagamento de arestas. É possível ultrapassar esta dificuldade utilizando apenas cofragem metálica aliada a um controlo de qualidade que verifique a conformidade da geometria.

Uma vez que todas as arestas das aduelas eram vivas, algumas esquinas foram esmagadas quando foram colocados blocos sobre outros. Se as arestas forem boleadas ou quebradas o problema mencionado será eliminado 'Fig. 20'.

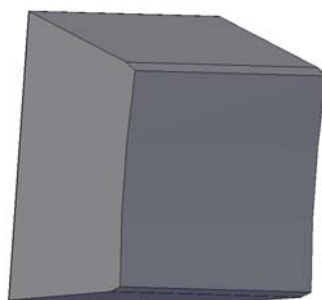


Figura 20. Aduela com arestas diagonais.

A montagem das aduelas foi feita poucos dias após a betonagem, assim a reduzida resistência do betão devida ao pouco tempo de cura permitiu o fácil esmagamento das arestas. Apesar de a resistência do betão nesta altura ser mais do que suficiente para resistir às cargas do arco, os defeitos estéticos eram evidentes.

O posicionamento dos blocos foi problemática quando estes eram elevados e inclinados numa posição diferente da qual iriam ter quando assentes. Utilizando um garibalde ou correias de comprimento fixo é possível garantir que as aduelas quando elevadas mantêm a inclinação correcta 'Fig. 21'. O processo de assentamento é mais demorado quando não existem meios de garantir a inclinação. Por sua vez, a utilização de cimbra é essencial em termos de rapidez de construção e garantia de assentamento correcto. Um sistema de cimbra metálico baseado no sistema de prumos utilizado é proposto na 'Fig. 22'.

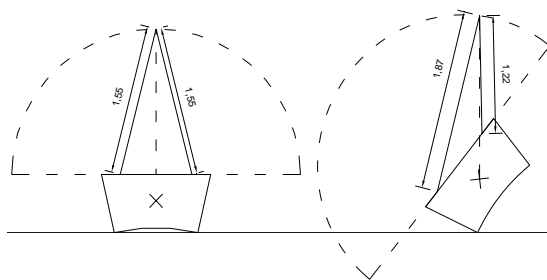


Figura 21. Elevação de aduela com correia de comprimento fixo.

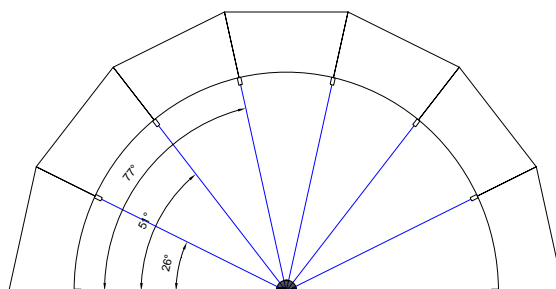


Figura 22. Sistema de cimbra metálico proposto para o vão de 4,0 m.

## 8. CONCLUSÃO

A partir da construção do protótipo foi possível verificar que a produção de aduelas em betão e a sua montagem em arco é executável com elevada rapidez. Os blocos são fáceis de transportar e movimentar no estaleiro sendo necessários poucos meios humanos (com pouca especialização) e mecânicos para efectuar o trabalho sendo possível obter a estética similar à de um arco de pedra. São apresentadas três soluções para pequenos e médios vãos comuns e pré-dimensionadas para o pior caso de carregamento.

No entanto existem alguns problemas que subsistem na construção do arco que atrasam o seu processo de execução que podem ser que minimizados através das medidas propostas. A principal desvantagem deste sistema é apresentar-se como uma solução única para vários casos de aplicação resultado em sobredimensionamento da espessura do arco. Apesar de conotar segurança, representa uso excessivo de betão. Apesar de alguns aspectos precisarem de ser refinados, este sistema deve ser encarado como um produto comercial capaz de contribuir para a construção nova de pontes de alvenaria em arco com a qualidade e durabilidade que caracteriza esta tipologia.

## REFERÊNCIAS

- [1] HUERTA, Santiago – Mechanics of masonry vaults: The equilibrium approach. Historical Constructions, Guimarães, 2001.
- [2] COSTA, P. M. - Análise da construção e do comportamento duma ponte de pedra. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [3] HEYMAN, J. – Structural analysis: a historical approach. Cambridge University Press, 1998.
- [4] HEYMAN, J. – The stone skeleton: Structural engineering of masonry architecture. Cambridge University Press, 1995.
- [5] RING2.0 – Analysis software for masonry arch bridges, 2008.